# 内蒙古黄河流域生态保护恢复优先区识别

陆 莹， 张 敏， 王彦阁
（内蒙古工业大学建筑学院，内蒙古 呼和浩特 010051）

**摘 要**：如何科学识别生态保护恢复优先区域，分区实施不同生态恢复策略，是当前生态保护恢复工作面临的难题。本文以内蒙古黄河流域为研究对象，采用空间主成分分析法（SPCA）和形态学空间格局分析法（MSPA）等方法开展生态安全评价，并结合景观要素匹配度识别生态保护恢复区域。结果表明：（1）研究区以中等生态安全水平区域为主，占研究区面积的40.58%。（2）MSPA和最小累积阻力模型（MCR）分析显示研究区有14个生态源地（占研究区面积的20.92%）、42条生态廊道和78个生态节点。（3）研究区62个子流域中景观要素匹配等级高的子流域有8个，面积占比为23.34%，匹配等级低的子流域有38个，面积占比为43.20%。（4）研究区三级生态恢复优先区面积最大，占比为35.53%，一级生态恢复优先区面积占比为18.63%。基于生态保护恢复优先区识别结果，探讨了不同区域的恢复策略，可为内蒙古黄河流域生态保护与高质量发展提供依据。

**关键词**：生态保护恢复优先区；生态安全；景观格局；内蒙古黄河流域

科学识别生态恢复优先区域，分区开展生态恢复，是当前生态恢复面临的难题。黄河流域是我国北方重要的生态屏障，在国家“两屏三带”生态安全战略格局中，是连接青藏高原、黄土高原和北方防沙带的生态廊道[1]。黄河流域的生态安全因其自然环境复杂、脆弱，并与人类活动密切相关而受到广泛关注，其复杂多样的生态问题严重威胁着区域生态系统的安全和稳定[2]。因此，黄河流域一直是我国生态保护和建设的重点地区，建立沿黄地区的生态安全模式是实现该区域可持续发展的重要途径[3]。针对流域突出的生态问题，我国先后开展了退耕还林还草、水土保持、“三北”防护林等生态工程和三江源、黄河湿地等自然保护区的建设。2019年，我国提出黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略，黄河流域生态保护恢复工作的重要性和紧迫性已经被许多研究者所认识。

近年来，随着气候变化和人类活动的加剧，内蒙古黄河流域景观格局发生了巨大变化，由此引发了生态系统服务能力下降、生物多样性锐减等问题。虽然内蒙古加强黄河流域生态保护与治理的工作在“库布齐模式”荒漠化防治、河套灌区盐碱地治理、乌梁素海水污染综合治理等方面取得了积极成效，但黄河流域作为典型的生态脆弱区，其生态系统极易发生退化，恢复难度大且缓慢。目前内蒙古黄河流域面临林地、草地、湿地衰退，沙漠化、土壤盐渍化、水土流失、生物多样性降低等生态问题[4-5]，因此，针对性进行内蒙古黄河流域生态保护恢复优先区识别尤为重要。

生态保护恢复优先区的识别是构建区域生态安全格局、维护区域生态系统稳定、开展生态保护恢复工作的前提条件[6-7]。以往研究大多基于生态安全评价或景观要素识别确定生态恢复的优先区域[8-9]，常用的生态安全评价模型包括“压力-状态-响应”（PSR）模型[10]、“驱动力-状态-响应”（DSR）模型、“驱动力-压力-状态-影响-响应”模型（DPSIR）[11-12]、“驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应”（DPSEEA）

**收稿日期**：2024-07-31； **修订日期**：2024-09-10
**基金项目**：国家自然科学基金项目（31901170，32260279）；中央引导地方科技发展项目（2022ZY0137）；内蒙古自然科学基金项目（2019MS03082）；自治区直属高校基本科研业务费项目（ZTY2024042）
**作者简介**：陆莹（1999-），女，硕士研究生，主要从事生态规划与修复研究. E-mail: Yinglu_7@163.com
**通讯作者**：王彦阁. E-mail: yangewang@imut.edu.cn

模型、“驱动力-压力-状态-暴露-响应”(DPSER)模型、“状态-隐患-响应”(SDR)模型等,结合空间分析的研究较少,难以体现区域生态安全的空间分布格局。生态系统受控于自然环境要素、生物要素和人类活动,因此评价因子的选取要体现自然和人为因素对复合生态系统的作用机制。随着城市自然生态系统与社会经济系统的相互影响愈来愈烈,区域景观格局发生了剧烈的时空演变,原本完整均质的自然生态系统逐渐向复杂异质的格局发展[13],这种改变也可能会导致生态系统服务水平降低,从而影响区域生态安全。

基于此,本文以内蒙古黄河流域为研究对象,选择“环境基础-人为干扰-景观格局”的角度来研究生态安全问题。构建了包括自然因素、人类社会因素和景观格局因素的内蒙古黄河流域生态保护恢复评价三维框架,利用空间主成分分析法(Spatial Principal Component Analysis,SPCA)定量评价研究区的生态安全水平,并将生态安全评价结果作为阻力面,通过形态学空间格局分析法(Morphological Spatial Pattern Analysis,MSPA)和最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance Model,MCR)对景观要素进行识别,综合考虑生态系统安全和景观要素的匹配度,确定生态恢复的优先区域并针对性提出生态保护恢复策略。本研究可丰富流域生态系统生态安全评价理论与技术框架,完善黄河流域生态安全评价体系,为区域生态安全评价提供借鉴。

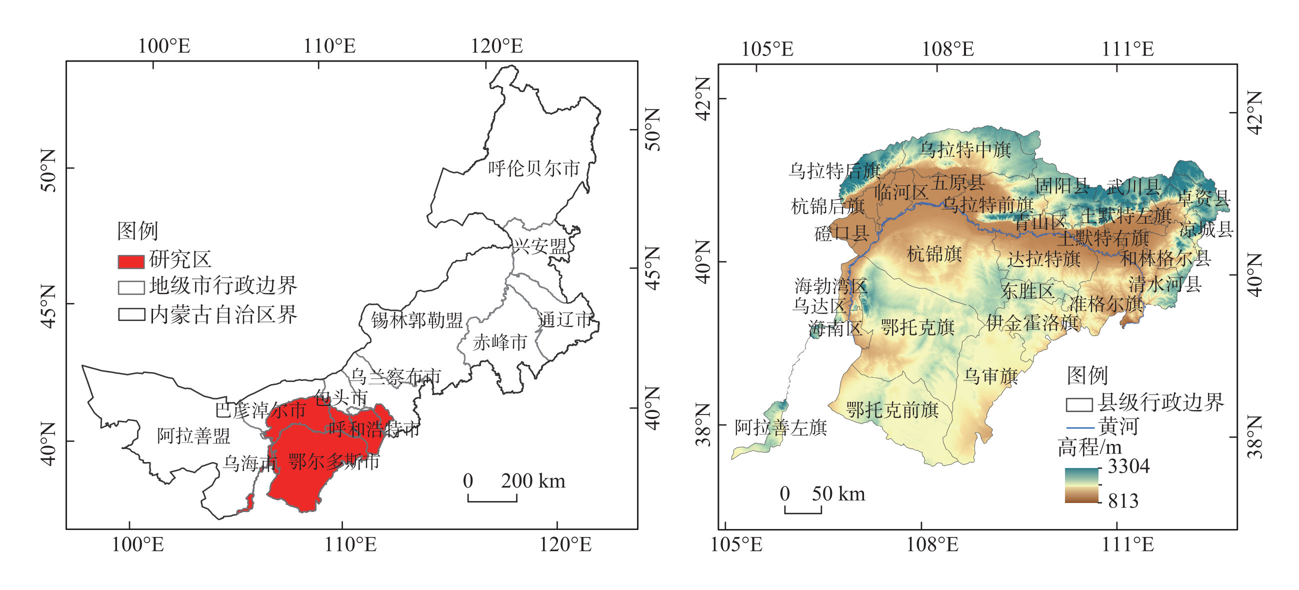
## 1　数据与方法

### 1.1　研究区概况

内蒙古黄河流域地处内蒙古自治区西部,黄河自宁蒙交界处都思兔河口入境,从准格尔旗马栅乡出境,流经长度843.50 km,穿行于乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地和河套灌区及土默川平原,在阴山南麓与鄂尔多斯高原之间形成“几”字弯[14],横跨阿拉善盟、乌海市、巴彦淖尔市、包头市、鄂尔多斯市、呼和浩特市和乌兰察布市7个盟市,42个旗县区,研究区总面积为15.19×10$^4$ km$^2$(图1)。流域内气温自东北向西南呈递减趋势,降水量自东向西逐渐减少,东南多雨,西北干旱。

### 1.2　数据来源

本研究主要采用数字高程模型(DEM)、归一化植被指数(NDVI)、土壤类型、土地利用数据、道路数据、香农均匀度指数(SHEI)和蔓延度指数(CONTAG)。通过DEM数据提取坡度,根据土地利用数据提取水体、城镇用地、居民点、工业用地数据;利用ArcGIS软件计算距水体、城镇用地、居民点、工业用地、道路的距离。夜间灯光数据采用中国类DMSP-OLS灯光数据。香农均匀度指数(SHEI)和蔓延度指数(CONTAG)基于ArcGIS和Fragstats软件协同计算,利用移动窗口法对其进行空间处理,数据




注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)1822号,对底图边界无修改。下同。

图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

来源信息见表1。将所有数据的坐标系参考统一为WGS 1984后进行预处理,栅格数据重采样后分辨率均为30 m×30 m。

### 1.3 研究方法

1.3.1 生态安全评价 本研究从“环境基础-人为干扰-景观格局”的角度出发,构建研究区生态安全评价指标体系。根据文献经验和研究区实际情况,采用自然断点法将每个指标因子的生态安全分为低、中低、中等、中高、高生态安全水平5个等级。

采用空间主成分分析法获得统计学上显著的主成分(累积贡献率超过85%)[15],以及各主成分的特征值、方差贡献率、累积贡献率和空间负荷矩阵。根据计算公式,将综合生态安全指数定义为多个主成分的加权和,权重用各主成分对应的方差贡献率表示。公式为[16]:

$$\mathrm{ESI}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(a_{ij}F_{j}\right) \tag{1}$$

式中:ESI为生态安全综合评价结果;$a_{ij}$为$i$栅格的相应$j$主成分;$F_j$为第$j$个主成分的方差贡献率(%);$m$和$n$为栅格和主成分的数量。

1.3.2 景观要素识别 通过GuidosToolbox软件,将ArcGIS重分类赋值后的二值栅格文件运用八邻域法进行MSPA分析,选择面积大于50 km²的核心区作为生态源。可能性连接度指数(PC)被广泛用于评价景观连通性,利用Conefor 2.6和其在ArcGIS上的插件Conefor inputs计算斑块重要性指数(dPC)。公式如下:

$$\mathrm{PC}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{i}\times a_{j}\times P_{ij}^{*}}{A_{L}^{2}} \tag{2}$$

$$\mathrm{dPC}=\frac{PC-PC_{remove}}{PC}\times 100 \tag{3}$$

式中:PC为生态斑块可能的连通性指数;$a_i$和$a_j$分别为斑块$i$和$j$的面积(km²);$n$为区域景观中各斑块的总数;$A_L$为总景观面积(km²);$P_{ij}^{*}$为斑块$i$和$j$之间物种融合的最大可能性;dPC为斑块重要性指数,表示现有斑块对维持景观连通性的重要性。$PC_{remove}$表示去除一个生态斑块后可能的连通性指数。

将生态安全评价结果作为阻力面,基于最小累积阻力模型(MCR)识别生态廊道,公式如下:

$$MCR=f_{\min}\sum_{j=n}^{i=m}\left(D_{ij}\times R_{i}\right) \tag{4}$$

式中:$MCR$为生态源斑块$j$在空间中扩散至某点的最小累积阻力值;$f$为$MCR$与变量间乘积($D_{ij}\times R_i$)的函数;$D_{ij}$为目标斑块源$j$至其他斑块源$i$所经过的空间距离(km);$R_i$为斑块源$i$在空间中某一方向上的扩散阻力系数。

基于重力模型生成生态源地之间的相互作用矩阵[17],公式如下:

$$G_{ij}=\frac{L_{\max}^{2}\ln(S_{i}S_{j})}{L_{ij}^{2}P_{i}P_{j}} \tag{5}$$

式中:$G_{ij}$为生态源$i$与生态源$j$之间的交互力;$L_{\max}^{2}$为所有生态廊道的最大阻力值的平方;$S_i$和$S_j$为生态源$i$和$j$的面积(km²);$L_{ij}^{2}$为生态源$i$与$j$之间的生态廊道累积阻力值的平方;$P_iP_j$为生态源$i$和$j$之间的抗性值。

1.3.3 生态保护恢复优先区域识别 利用ArcGIS中的水文分析工具和研究区DEM数据,将研究区域划分为62个子流域[18-19],选择各生态源子流域的景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)代表景观要素的空间特征,通过等权重法确定景观要素的数量关系和空间特征的权重,采用综合加权指数法计算景观要素的匹配等级,公式如下[20]:

$$R_{m}=0.5\times\sum_{i=1}^{s}Z_{mi}\times W_{mi}+0.5\times\sum_{j=1}^{n}Z_{mj}\times W_{mj} \tag{6}$$

式中:$R_m$为第$m$个子流域景观要素的匹配度;$s$为子流域内重要生态源和一般生态源的数量之和;$Z_{mi}$为第$m$

**表1 数据来源**

**Tab. 1 Data sources**

| 数据名称 | 格式 | 空间分辨率 | 来源 |
|---|---|---|---|
| 数字高程模型(DEM) | 栅格数据 | 30 m | 地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/) |
| 归一化植被指数(NDVI) | 栅格数据 | 30 m | 数字地球开放平台(https://open.geovisearth.com/) |
| 土壤类型 | 栅格数据 | 1000 m | 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn) |
| 土地利用 | 栅格数据 | 30 m | 中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn) |
| 道路数据 | 矢量数据 | - | OSM官网(https://download.geofabrik.de/) |
| 夜间灯光 | 栅格数据 | 1000 m | Harvard Dataverse平台 |

个子流域第 $i$ 个生态源的景观形状指数的标准化值;$W_{mi}$是第 $m$ 个子流域的第 $i$ 个生态源形状指数的权重;$n$ 为景观要素的数量;$Z_{mj}$为第 $m$ 个子流域第 $j$ 个景观要素的标准化值;$W_{mj}$为第 $m$ 个子流域的第 $j$ 个景观要素的权重。

根据生态环境的受损程度,确定整体恢复工作的优先级[20-21],将生态恢复的优先区域划分为三个等级(表2)。

**表2　内蒙古黄河流域生态恢复优先区域分类**

**Tab. 2　Priority regional classification of ecological restoration in the Yellow River Basin of Inner Mongolia**

| 生态安全水平等级 | 景观要素匹配等级 | | |
|---|---|---|---|
| | 高 | 中 | 低 |
| 高 | – | – | 三级恢复区 |
| 中 | – | – | 三级恢复区 |
| 低 | 一级恢复区 | 一级恢复区 | 二级恢复区 |

## 2　结果与分析

### 2.1　内蒙古黄河流域生态安全评价

根据内蒙古黄河流域的自然地理条件、景观生态现状并结合相关研究成果,按照系统性、科学性、典型性以及可操作性原则,共选取12项指标分3个维度进行生态安全评价(表3)。

在自然因素方面,海拔和坡度是主要地形因子,会影响土地资源在空间上的分布及其利用方式,对土壤侵蚀过程及滑坡、崩塌等自然灾害有潜在影响,因此选择海拔和坡度作为地形指标;土壤类型直接关系到植物生产、生物多样性保护、污染物的累积和生态系统的稳定性;选取NDVI反映地表植被分布的程度,植被覆盖度越大,植被分布越紧密,生态安全等级越高;水源具有改善维持生境的生态系统服务功能,距水源越近,生态安全等级越高,越有利于生态源地的扩展。

在人类社会因素方面,距城镇用地距离反映了城镇扩张对生态安全的影响;居民点的建设改变了原有的土地利用覆被与景观构成,距居民点距离远近可以反映人类生活对生态系统干扰的强度;距工业用地距离反映了工业生产活动对景观格局的影响程度;交通道路对周边土地利用存在影响,产生土地利用结构的变化;选取夜间灯光数据反映人类活动影响的强度大小。

在景观格局因素方面,选取香农均匀度指数(SHEI)表示给定景观丰富度的景观最大可能多样性,景观丰富度较高的地区往往生态系统更为稳定;选取蔓延度指数(CONTAG)反映不同景观组成类型斑块的团聚程度或延展趋势,其值高说明优势景观组成类型有良好的连通性,反之则表明景观破碎化程度较高。

通过SPCA,对生态安全评价因子进行了降维处理,生成了12个主成分(表4)。前6个主成分的累积贡献率为87.82%,说明在12个原始变量里有超过87%的信息可以捕获在这6个主成分中,其贡献率分别为43.47%、16.44%、10.65%、8.15%、5.73%、3.38%,即前6个主成分可以很好地解释研究

**表3　生态安全评价指标体系**

**Tab. 3　Ecological security evaluation index system**

| 评价维度 | 评价指标 | 生态安全等级分级标准 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 |
| 自然因素 | 海拔/m | 1730~3304 | 1482~1730 | 1309~1482 | 1139~1309 | 813~1139 |
| | 坡度/(°) | >25 | 15~25 | 8~15 | 3~8 | 0~3 |
| | 土壤类型 | 0~0.50 | 0.50~0.87 | 0.87~1.81 | 1.81~7.75 | >7.75 |
| | NDVI/% | −20~−2 | −2~15 | 15~23 | 23~33 | 33~78 |
| | 距水体距离/km | >21 | 12~21 | 7~12 | 3~7 | 0~3 |
| 人类社会因素 | 距城镇用地距离/km | 0~20 | 20~42 | 42~104 | 104~175 | 175~220 |
| | 距居民点距离/km | 0~8 | 8~47 | 47~92 | 92~121 | 121~153 |
| | 距工业用地距离/km | 0~6 | 6~13 | 13~23 | 23~35 | 35~73 |
| | 距道路距离/km | 0~0.02 | 0.02~0.05 | 0.05~0.10 | 0.10~0.16 | 0.16~0.33 |
| | 夜间灯光指数 | 40.76~63.00 | 21.99~40.76 | 9.88~21.99 | 0~9.88 | 0 |
| 景观格局因素 | 香农均匀度指数(SHEI)/% | 0~18.43 | 18.43~38.82 | 38.82~57.64 | 57.64~78.43 | 78.43~99.99 |
| | 蔓延度指数(CONTAG)/% | 0~18.52 | 18.52~39.63 | 39.63~57.41 | 57.41~75.57 | 75.57~94.46 |

表4 主成分的特征值和贡献率

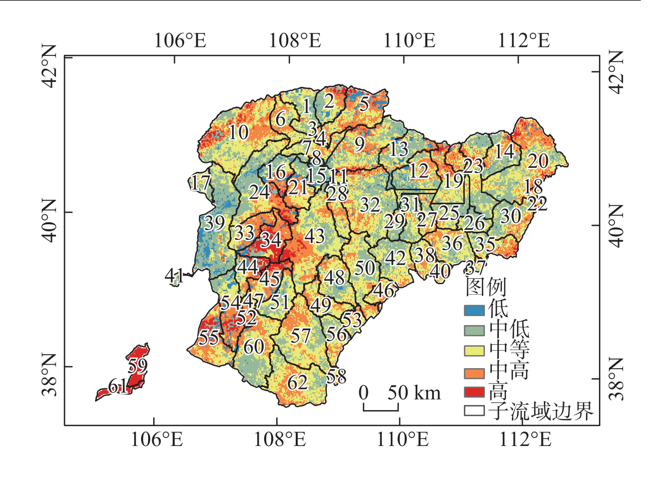
Tab. 4 Eigenvalues and contribution rates of principal components

| 主成分 | 特征值 | 方差贡献率/% | 累积贡献率/% |
|---|---|---|---|
| 一 | 0.0529 | 43.47 | 43.47 |
| 二 | 0.0200 | 16.44 | 59.92 |
| 三 | 0.0130 | 10.65 | 70.57 |
| 四 | 0.0099 | 8.15 | 78.72 |
| 五 | 0.0070 | 5.73 | 84.45 |
| 六 | 0.0041 | 3.38 | 87.82 |
| 七 | 0.0040 | 3.29 | 91.12 |
| 八 | 0.0032 | 2.64 | 93.76 |
| 九 | 0.0028 | 2.33 | 96.09 |
| 十 | 0.0023 | 1.92 | 98.01 |
| 十一 | 0.0014 | 1.17 | 99.17 |
| 十二 | 0.0010 | 0.83 | 100.00 |

区生态安全格局的构成。

分析原始指标对各主成分的负荷发现，在自然因素方面，土壤类型在第三主成分中负荷最高，为0.7746；NDVI和距水体距离在第六主成分中负荷最高，分别为0.3260、0.2485；海拔、坡度的负荷较低。说明土壤类型对研究区生态安全有重要影响，NDVI、距水体距离有较大影响，海拔、坡度的影响较小。在人类社会因素方面，距城镇用地距离、距居民点距离、夜间灯光指数在第五主成分的负荷最高，分别为0.3072、0.2322、0.7662；距工业用地距离在第三主成分中负荷最高，为0.4188；距道路距离的影响较小。说明人类活动对研究区的生态安全具有重要影响。在景观格局方面，SHEI的第四主成分负荷最高，为0.6938，CONTAG的第一主成分负荷最高，为0.7092，表明景观单元的多样性和连通性对研究区的生态安全均有重要影响，且连通性的影响最大。

将12个评价因子在ArcGIS栅格计算器中进行加权叠加，采用自然断点法将研究区的生态安全评价结果划分为低、中低、中等、中高、高5个等级（图2）。研究区中等生态安全水平的面积最大，为61664.00 km$^2$，占总面积的40.58%；生态安全水平低的面积为6764.90 km$^2$，占总面积的4.45%，该区域土地利用以荒地为主，植被稀少，生态环境较差，有必要在综合评价的基础上确定可行的恢复策略；中低生态安全水平面积为41024.69 km$^2$，占总面积的27.00%，该区域土地利用以荒地和草地为主，可以




注：图中数字为子流域编码。下同。

图2 内蒙古黄河流域生态安全水平网格尺度分布

Fig. 2 Grid-scale distribution of ecological security levels in the Yellow River Basin of Inner Mongolia

通过构建生态廊道，合理利用生态资源等方式提高生态安全水平；生态安全水平相对较高的面积为35646.58 km$^2$，占总面积的23.46%；生态安全水平高的面积为6838.60 km$^2$，占总面积的4.50%。这些区域的土地利用以草地和耕地为主，植被覆盖度较高，未来可以采取生态恢复措施来提高景观生态安全的稳定性。总体而言，研究区的生态安全为中等水平。低生态安全水平之间的连通性相对较低，不利于区域生态系统的可持续发展。因此，在发展经济的同时，应采取更积极的保护措施，防止该区域生态恶化，以满足今后发展的需要。

为便于生态保护恢复策略制定，将栅格尺度的生态安全评价结果转化为流域尺度上的生态安全格局分布，设定子流域面积所占比例最大的生态安全等级代表整个子流域的生态安全水平[22]，将各子流域的生态安全分为低、中、高3个等级（图3），其与栅格尺度的生态安全水平分布结果基本一致。这种划分方式虽然存在误差，但基本上可以代表研究区的生态安全状况，为流域尺度上的生态恢复优先区域识别奠定了基础。

### 2.2 内蒙古黄河流域景观要素识别

2.2.1 生态源地的识别 MSPA结果表明（图4），研究区的核心区面积较大，主要分布在西南部和北部，研究区东部和中部核心区面积小而分散。将基于MSPA的核心斑块导入Conefor 2.6软件中进行景观连通性分析，在综合考虑核心区斑块的景观连通性和空间分布特征的基础上，选择了14个核心区斑

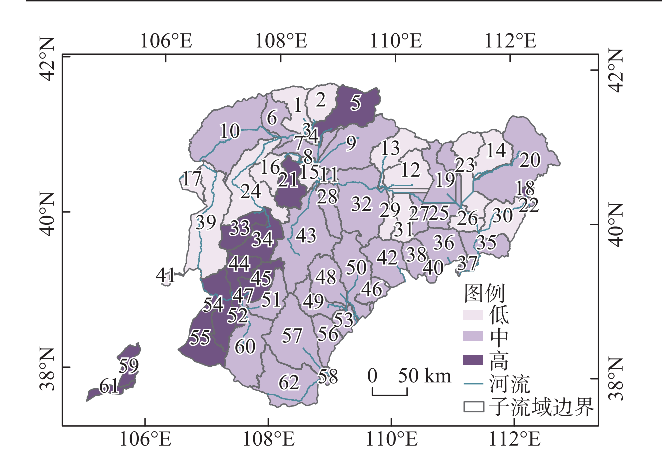



图3　内蒙古黄河流域生态安全水平流域尺度分布

Fig. 3　The distribution of ecological security levels in the Yellow River Basin of Inner Mongolia at the watershed scale

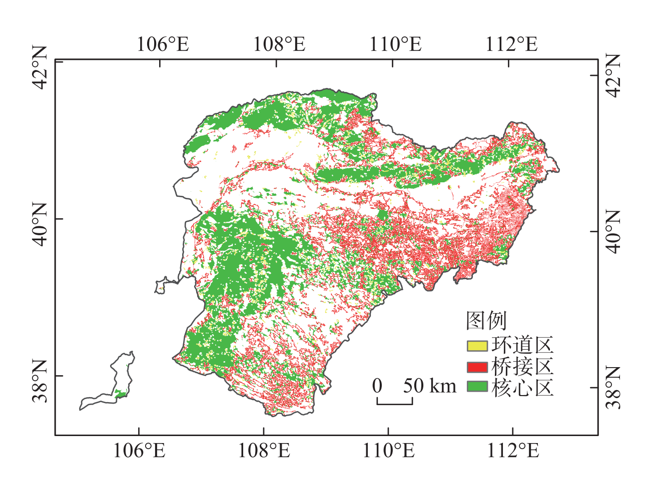



图4　基于MSPA的生态斑块分类

Fig. 4　Classification of ecological patches based on MSPA

块作为生态源地。根据dPC计算结果和生态源地面积,将dPC大于3的确定为重要生态源地,其余为一般生态源地。

研究区生态源地面积为31780.86 km²,占总面积的20.92%,其中重要生态源地面积为30900.97 km²。生态源地的土地利用以草地为主,主要集中在研究区的西南部和北部,周围大多有水系分布,具有良好的生态连通性。这是由于研究区北部处于黄河“几”字弯的最北边,水资源条件良好,植被覆盖度高,研究区西南部为大面积连续分布的草地,受人类活动的干扰较少。而研究区中部和东部主要以耕地和荒地为主,是人类活动的主要聚集地,植被覆盖度低。因此,中部和东部的生态源地面积小而分散,景观破碎化严重。

2.2.2　生态廊道和生态节点的识别　基于MCR模型,得到了各生态源地斑块与其他生态源地斑块之间的最小累积成本距离,将这些路径叠加形成了内蒙古黄河流域的生态廊道(图5)。研究共识别出42条生态廊道,全长4774.20 km。利用重力模型确定生态源地之间相互作用强度大于200的廊道为重要生态廊道,识别出20条重要生态廊道,全长1271.37 km,占全部生态廊道长度的26.63%。

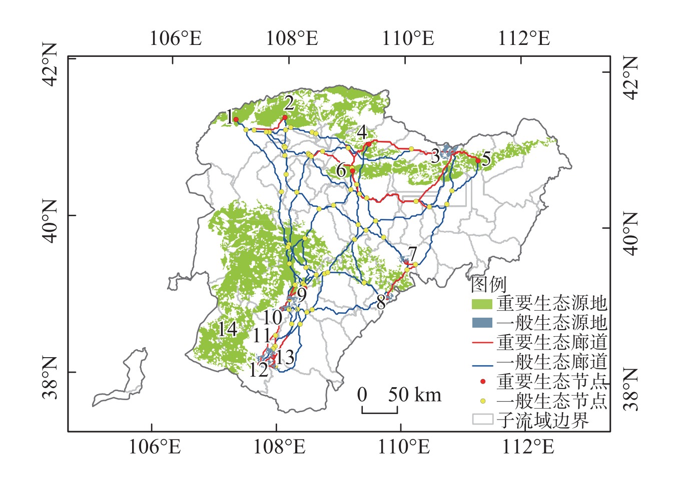



图5　内蒙古黄河流域生态要素的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of ecological elements in the Yellow River Basin of Inner Mongolia

研究区生态源地之间的相互作用强度具有明显的差异性。生态源地3与生态源地5的相互作用强度最强(相互作用强度为8956.45),主要因为两个生态源地之间的距离较近,景观阻力较小,动物更有可能在这两个生态源地之间迁移。生态源地7与生态源地13的相互作用强度最弱(相互作用强度为32.66),这与两个生态源地之间的距离和较大的抗性值有关。提取每个生态源地作为重要生态节点,将生态廊道的交叉点作为一般生态节点,共识别出78个生态节点,其中重要生态节点14个,一般生态节点64个。

### 2.3　内蒙古黄河流域景观要素匹配等级

景观要素匹配等级如图6所示,研究区有8个景观要素匹配等级高的子流域,总面积为35451.41 km²,包括研究区北部的子流域5、9、10,中部的子流域33、34、43以及西南部的子流域54、55,占研究区总面积的23.34%;景观要素匹配等级中等的子流域有16个,总面积为50840.63 km²,包括研究区北部的子流域1、2、6、12、13、14、19、23,西南部的子流域24、39、44、45、51、60以及东南部的子流域42、50,占研究区总面积的33.46%;景观要素匹配等级低的子流域有38个,面积为65631.53 km²,占总面积的

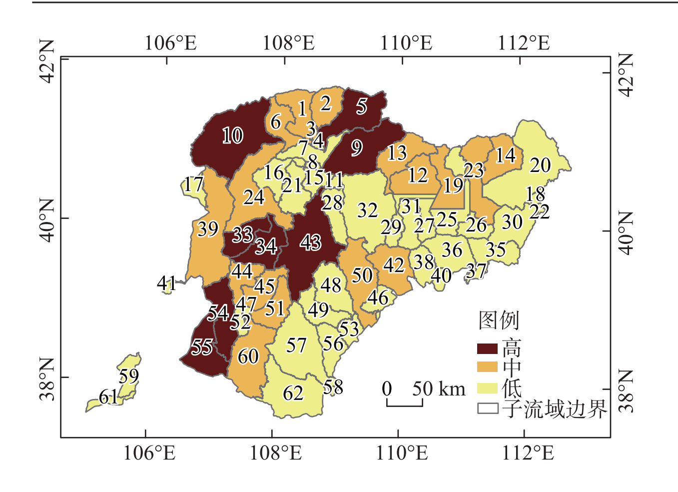



图6 内蒙古黄河流域景观要素的匹配等级

Fig. 6 Matching levels of landscape elements in the Yellow River Basin of Inner Mongolia

43.20%，主要分布在中部和东部。总体而言，研究区景观要素匹配等级较低，对流域的生态安全会产生较大的影响。

## 2.4 生态恢复优先区域及恢复策略

设定子流域生态安全水平等级优先于景观要素匹配等级（表2），确定三级生态恢复优先区域（图7）。针对各区域实际情况，遵循生态优先、保护优先、以自然恢复为主的原则，提出分区恢复策略。一级恢复区包括8个子流域，总面积为28309.24 km$^2$，占总面积的18.63%。这些区域的景观要素匹配等级普遍较高，但生态安全水平低，在一定程度上削弱了景观要素对生态系统的正效应。因此，在一级恢复区的8个子流域以提高生态安全水平为主，重点进行修复整治。尽管各地区的发展有其地域性和历史性，但总体来看，一级恢复区城镇化水平较高，经济发展速度快，说明生态安全水平受到经济发展的影响，特别是草原沙化、耕地退化及城市污染等，与建国几十年来重经济发展、轻生态环境建设有很大关系。对于草场退化地区，如子流域13应适当加快退耕还牧步伐，调整牧业经营方式，尽快恢复重建稳定的草原生态系统。在坡度较大的山区，如子流域14、39应提高植树造林质量，将其打造为水源涵养地和天然绿色屏障。对于资源型城市鄂尔多斯，如子流域24在发展过程中应采取退耕还林、未利用地植被恢复等措施提高生态系统服务价值，来确保生态建设的积极影响大于城镇建设用地扩张的消极影响。黄河流域纬度最高处位于巴彦淖尔段，如子流域1、2应重点关注黄河凌汛期的安全问题，考虑恢复黄河故道引水改善乌梁素海和乌兰布和沙漠的生态环境。

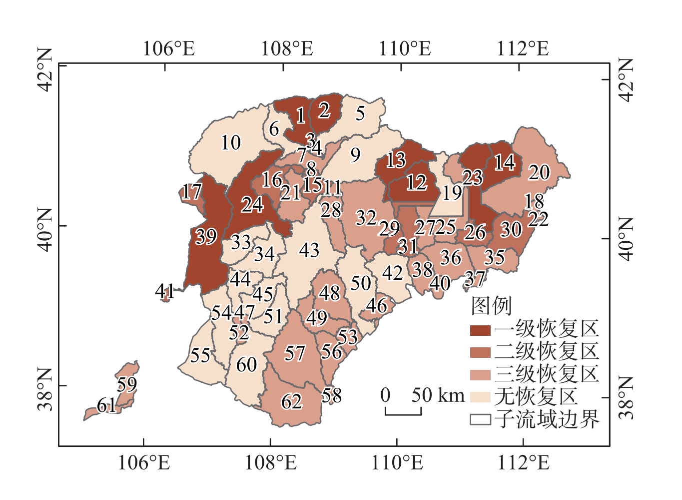



图7 内蒙古黄河流域生态恢复优先区域的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of priority areas for ecological restoration in the Yellow River Basin of Inner Mongolia

二级恢复区包括9个子流域，面积为11657.71 km$^2$，占总面积的7.67%，这些区域集中在研究区中部，景观要素匹配等级和生态安全水平均较低。在平原区，如子流域8、15、17应加强土壤盐渍化治理，逐步恢复土壤肥力条件。在黄土丘陵区，如子流域26、30应从梯田化、绿化等方面入手，减少水土流失、恢复重建受损景观。对典型干旱荒漠地区，如子流域41应采取“保护与建设并重，保护优先”的发展方针和“以灌为主、乔灌草相结合”的林业治沙措施。

三级恢复区包括29个子流域，面积为53973.82 km$^2$，占总面积的35.53%，这些区域集中在研究区东部，景观要素匹配等级较低，但生态安全处于中高水平。因此，景观格局优化是提高生态安全水平的基础，应增加不同类型的景观斑块面积并且确保其能持续发育。在具有生态源地的地区，如子流域7、25、46、47、52，应明确核心源地的边界，避免不必要的开发和破坏，加强源地周边地区与核心源地的联系，进一步提高生态源地的安全水平。对有生态廊道和生态节点的区域，如子流域27、28、32、49等，应进一步优化重要廊道，杜绝建设用地挤占生态廊道内生态空间的现象，增加生态廊道宽度并进行周边绿道的规划和建设。对于没有景观要素分布的地区，如子流域22、35、40、59、61，调整景观格局应为未来生态恢复的重点，考虑以天然群落布局为基础，通过自然修复、人工造林、种草等措施实现重构

和优化景观要素,达到流域生态安全的基本要求。

## 3 讨论

利用空间主成分分析法评价内蒙古黄河流域生态安全格局,土壤类型、夜间灯光指数和景观连通性对研究区的生态安全影响最大,NDVI、距水体距离、距工业用地距离、距城镇用地距离、距居民点距离、景观多样性对研究区生态安全有普遍影响,海拔、坡度、距道路距离对研究区的生态安全影响并不显著。内蒙古黄河流域中等生态安全水平的面积最大,集中连片的分布在研究区中部。究其原因,子流域9、19、20、22、32、35等经济较为发达,人口、资源、产业较为集中,工业发展较快。河套灌区内的耕地开垦及黄河两岸的城镇建设,致使这些地区景观斑块破碎化严重。荒漠地区生态系统十分脆弱,子流域12、13、14、23、26、30、39、41等生态安全水平较低。高生态安全水平主要分布在研究区西部,以鄂尔多斯市(子流域21、33、34、44、45、52、54、55)为主,草地是该区域面积最大的土地利用类型,该结论和姚林杰[4]、刘卫等[23]、王爱琼[24]、Zhang[25]等对该研究区的结论大体一致。

将生态安全评价结果作为阻力面,通过形态学空间格局分析法和最小累积阻力模型识别景观要素,内蒙古黄河流域生态源地呈北部、西部多,中部少,东部破碎化的分布特征。较长生态廊道主要分布于研究区北部与南部生态源地之间,较短生态廊道主要分布于东部生态源地之间。提取生态廊道的交叉点为生态节点,其主要土地利用类型为草地。该结论和姚林杰[4]对本研究区的结论有所不同,主要是由于数据来源和生态源地的提取方法不同。综合考虑生态安全和景观要素的匹配度,确定一级生态恢复优先区主要分布在研究区北部,二级生态恢复优先区主要分布在研究区中部,三级生态恢复优先区主要分布在研究区东部。总体而言,内蒙古黄河流域生态恢复优先区以三级恢复区为主,其次为一级恢复区,二级恢复区所占比例较小。结合本研究结论可在子流域12、13、15、16、24、39实施退耕还林、还牧工程,整合鄂尔多斯市东部分散的生态源地,如子流域42、46、48、50,并重点对一级生态恢复优先区开展生态修复工程,以提高自然生态单元的完整性[26]。

结合生态安全评价和景观要素识别可有效确定生态恢复优先区域[3,15-16,20],该方法在研究区有较强的适宜性,可丰富黄河流域生态安全评价理论与技术体系。内蒙古黄河流域作为黄河中上游的关键一环,其生态问题不仅影响自身建设,更关系到下游地区的可持续发展。鉴于内蒙古黄河流域各地区文化底蕴深厚,旅游资源丰富,在生态保护与经济发展过程中难免出现冲突和发展不平衡等问题,综合自然因素和人类社会因素制定评价指标体系,结合景观格局得到生态安全评价结果,为生态保护恢复优先区的识别提供了先决条件。

## 4 结论

随着景观生态学的发展,景观生态安全评价与生态安全格局构建作为格局与过程互馈效应的表征日渐受到学界的广泛关注,但目前相关研究多以黄河流域为研究对象展开,针对内蒙古黄河流域的研究较少。本文以内蒙古黄河流域为研究区,以子流域为单元识别生态保护恢复优先区,为后续精细化、针对性进行生态恢复管理奠定了基础。研究得出以下结论:

(1) 内蒙古黄河流域生态安全水平以中等水平为主,土壤类型、夜间灯光指数和景观连通性对研究区的生态安全影响较大。低生态安全水平区域占总面积的4.45%,土地利用以荒地为主,植被稀少,子流域之间的连通性较低,不利于区域生态系统的可持续发展;中低生态安全水平区域占总面积的27.00%,土地利用类型以荒地和草地为主;中等生态安全水平占总面积的40.58%;中高生态安全水平占总面积的23.46%;高生态安全水平占总面积的4.50%,主要分布在研究区西部,土地利用类型以草地为主。

(2) 内蒙古黄河流域生态源地呈北部、西部多,中部少,东部破碎化分布的特征,生态源地周围大多有水系分布,具有良好的生态连通性。北部生态源地位于黄河“几”字弯的北侧,水资源条件良好,植被覆盖度高;西南部生态源地为大面积连续分布的草地,受人类活动的干扰较少;中部和东部的生态源地以耕地和荒地为主,面积小而分散。较长生态廊道主要分布在北部和南部生态源地之间,较短生态廊道主要分布在东部生态源地之间。受生态

源地之间的距离和抗性值等影响,生态源地之间的相互作用强度具有明显的差异性。

(3) 研究区景观要素匹配等级偏低,对流域的生态安全影响较大。景观要素匹配等级高的子流域占总面积的23.34%,主要分布在西部,该区域生态廊道密集,生态节点较为丰富;景观要素匹配等级中等的子流域占总面积的33.46%,主要分布在西部和东北部,该区域由于城市化、开矿、围栏养殖、草地退化等因素使得生境斑块破碎,景观要素匹配等级较低;景观要素匹配等级低的子流域占总面积的43.20%,主要分布在中部和东部,这与该区域生态环境本底较差以及资源型城市的发展模式有关。

(4) 研究区一级恢复区主要分布在北部,占总面积的18.63%,是所有子流域中问题最突出、需要优先开展恢复和治理的区域,应以提高生态安全水平为主,重点进行修复整治,可适当加快退耕还牧步伐,调整牧业经营方式,采取未利用地植被恢复等措施提高生态系统服务功能;二级恢复区主要分布在中部,占总面积的7.67%,该区域在提高生态安全水平的同时,应尽可能提高景观要素的匹配等级,制定空间模式与形态引导恢复受损景观;三级恢复区主要分布在东部,占总面积的35.53%,优化该区域子流域的景观格局是提高生态安全水平的基础,增加景观斑块面积、调整景观斑块格局、提升景观多样性是该区域生态恢复的重点。

## 参考文献(References):


[1] Liu D, Chang Q. Ecological security research progress in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 111-121.

[2] David E B, David C, Günther F. Urbanization and the wealth of nations[J]. Science, 2008, 319(5864): 772-775.

[3] Yan Y, Ju H, Zhang S, et al. Spatiotemporal patterns and driving forces of urban expansion in coastal areas: A study on urban agglomeration in the pearl river delta, China[J]. Sustainability, 2020, 12(1): 191-191.

[4] 姚林杰. 基于生态系统服务的内蒙古黄河流域生态安全格局构建[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023. [Yao Linjie. Ecological Security Pattern of Yellow River Basin of Inner Mongolia Based on Ecosystem Services[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023. ]

[5] 奚雪松, 高俊刚, 郝媛媛, 等. 多维复合空间视角下的黄河生态带构建——以黄河流域内蒙古段为例[J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 721-741. [Xi Xuesong, Gao Jungang, Hao Yuanyuan, et al. The construction of the Yellow River Ecological Belt from a multi-dimensional composite spatial perspective: A case study of Yellow River Basin within Inner Mongolia[J]. Natural Resources Journal, 2023, 38(3): 721-741. ]

[6] 易行, 白彩全, 梁龙武, 等. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 37-52. [Yi Xing, Bai Caiquan, Liang Longwu, et al. The evolution and frontier development of land ecological restoration research[J]. Natural Resources Journal, 2020, 35(1): 37-52. ]

[7] Shi Y S, Li J Q, Xie M Q. Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 729-741.

[8] 李梦怡, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游水生态安全评价及驱动要素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 39-47. [Li Mengyi, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Evaluation of ecological water security and analysis of driving factors in the lower Tarim River, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 39-47. ]

[9] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1120-1127. [Wu Jinhua, Liu Siyu, Bai Shuai. Identification and optimization of ecological corridors in Shenmu City based on landscape ecological security [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1120-1127. ]

[10] Quigley T M, Haynes R W, Hann W J. Estimating ecological integrity in the interior Columbia River basin[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 153(1): 161-178.

[11] Chuang Y H, Yu R F, Chen W Y, et al. Sustainable planning for a coastal wetland system with an integrated ANP and DPSIR model for conflict resolution[J]. Wetlands Ecology and Management, 2018, 26(6): 1015-1036.

[12] Shi S X, Tong P S. Evaluation system and spatial distribution pattern of ecological city construction-based on dpsir-topsis model[J]. Ecology Environment & Conservation, 2019, 17(1): 601-616.

[13] 王计平, 陈利顶, 汪亚峰. 黄土高原地区景观格局演变研究综述[J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 535-542. [Wang Jiping, Chen Liding, Wang Yafeng. Research on landscape pattern change in Loess Plateau: Current status, issues and trends[J]. Geographical Science Progress, 2010, 29(5): 535-542. ]

[14] 梁洁, 黄贤金, 王友凤, 等. 内蒙古黄河流域国土空间规划[Z]. 内蒙古自治区国土空间规划院, 2021-12-16. [Liang Jie, Huang Xianjin, Wang Youfeng, et al. Territorial spatial planning of the Yellow River Basin in Inner Mongolia[Z]. Inner Mongolia Autonomous Region Territorial Spatial Planning Institute, 2021-12-16. ]

[15] Wang Z Y, Shi P J, Zhang X B, et al. Research on landscape pattern construction and ecological restoration of Jiuquan City based on ecological security evaluation[J]. Sustainability, 2021, 13(10): 5732.

[16] Yan Y, Ju H, Zhang S, et al. The construction of ecological security patterns in coastal areas based on landscape ecological risk assessment—A case study of Jiaodong peninsula, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(22): 12249.

[17] Zhao S M, Ma Y F, Wang J L, et al. Landscape pattern analysis and ecological network planning of Tianjin City[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 46: 126479.

[18] Zheng T, Zhou Z, Zou Y, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics and spatial flow process of soil conservation service in Jinghe Basin of China[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1794.

[19] Liu L, Song W, Zhang Y, et al. Zoning of ecological restoration in the Qilian mountain area, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23): 12417.

[20] Zhang J, Chen H, Ma Y, et al. Identification of priority areas for ecological restoration based on ecological security and landscape elements[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 30(12): 35307-35325.

[21] Funk A, Martínez-López J, Borgwardt F, et al. Identification of conservation and restoration priority areas in the Danube River based on the multi-functionality of river-floodplain systems[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 763-777.

[22] 连世忠, 丁霖, 陈江平. 顾及空间自相关的地理国情信息统计格网尺度选择——以植被覆盖信息统计为例[J]. 测绘通报, 2017, 63(3): 46-51. [Lian Shizhong, Ding Lin, Chen Jiangping. Scale selecting of geographic national conditions information statistical grids with spatial autocorrelation—A case study of vegetation cover information statistics[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, 63(3): 46-51. ]

[23] 刘卫, 王克军, 李敬伟, 等. 黄河(内蒙古段)流域生态风险评价[J]. 环境与发展, 2016, 28(2): 27-31. [Liu Wei, Wang Kejun, Li Jingwei, et al. The regional ecological risk assessment of the Huanghe River (Inner Mongolia) [J]. Environment and Development, 2016, 28(2): 27-31. ]

[24] 王爱琼. 黄河流域土地生态安全评价及影响因素研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023. [Wang Aiqiong. Study on Land Ecological Security Evaluation and Influencing Factors in the Yellow River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. ]

[25] Zhang H, Zhang J, Lv Z, et al. Spatio-temporal assessment of landscape ecological risk and associated drivers: A case study of the Yellow River Basin in Inner Mongolia[J]. Land, 2023, 12(6): 1114.

[26] 许静, 廖星凯, 甘崎旭, 等. 基于MSPA与电路理论的黄河流域甘肃段生态安全格局构建[J]. 生态环境学报, 2023, 32(4): 805-813. [Xu Jing, Liao Xingkai, Gan Qixu, et al. Construction of ecological security pattern based on MSPA and circuit theory in Gansu section of the Yellow River Basin[J]. Journal of Ecological Environment, 2023, 32(4): 805-813. ]

# Identification of priority areas for the ecological protection and restoration of the Yellow River Basin in Inner Mongolia

LU Ying,　ZHANG Min,　WANG Yange

(School of Architecture, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot　010051, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Finding ways to scientifically identify the priority areas of ecological protection and restoration and implement adapted strategies in different regions is a challenge faced by current ecological protection and restoration work. This study was based on the Yellow River Basin in Inner Mongolia, and the ecological security evaluation was conducted using spatial principal component analysis (SPCA) and morphological spatial pattern analysis (MSPA). The ecological protection and restoration areas were identified by combining the matching degree of landscape elements. The results indicated that (1) the study area was dominated by areas with moderate ecological security, accounting for 40.58% of the total area. (2) 14 ecological sources (accounting for 20.92% of the study area), 42 ecological corridors, and 78 ecological nodes were identified by MSPA and minimum cumulative resistance model (MCR). (3) among the 62 sub-watersheds in the study area, 8 had a high matching level of landscape elements, accounting for 23.34% of the total area, and 38 watersheds had a low matching level, accounting for 43.20% of the total area. and (4) the priority areas of the third- and first-level ecological restoration accounted for 35.53% (the largest) and 18.63%, respectively. Based on the identification results of priority areas of ecological protection and restoration, the restoration strategies of different regions were discussed. Our results can provide a basis for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin in Inner Mongolia.

**Keywords:** priority areas for ecological protection and restoration; ecological security; landscape pattern; the Yellow River Basin in Inner Mongolia